

Environment Research and Technology Development Fund

環境研究総合推進費 終了研究成果報告書

5RF-2006 タイヤ粉塵由来マイクロプラスチックの時空間分布特性及び交通
流の影響解明
(JRMEERF20205R06)

令和2年度～令和4年度

Occurrence of Microplastics from Tire Wear Particles
and Effects of Road Traffic Flow on Spatiotemporal Distribution

＜研究代表機関＞
東京都立大学

＜研究分担機関＞
なし

＜研究協力機関＞

なし

○図表番号の付番方法について

「Ⅰ．成果の概要」の図表番号は「0．通し番号」としております。なお、「Ⅱ．成果の詳細」にて使用した図表を転用する場合には、転用元と同じ番号を付番しております。

「Ⅱ．成果の詳細」の図表番号は「サブテーマ番号．通し番号」としております。なお、異なるサブテーマから図表を転用する場合は、転用元と同じ図表番号としております。

令和5年5月

目次

I. 成果の概要	1
1. はじめに（研究背景等）	
2. 研究開発目的	
3. 研究目標	
4. 研究開発内容	
5. 研究成果	
5-1. 成果の概要	
5-2. 環境政策等への貢献	
5-3. 研究目標の達成状況	
6. 研究成果の発表状況	
6-1. 査読付き論文	
6-2. 知的財産権	
6-3. その他発表件数	
7. 国際共同研究等の状況	
8. 研究者略歴	
II. 成果の詳細	
II-1 タイヤ粉塵由来マイクロプラスチックの時空間分布特性及び交通流の影響解明・・・	11
（東京都立大学 都市環境学部）	
要旨	
1. 研究開発目的	
2. 研究目標	
3. 研究開発内容	
4. 結果及び考察	
5. 研究目標の達成状況	
6. 引用文献	
III. 研究成果の発表状況の詳細	28
IV. 英文Abstract	29

I. 成果の概要

課題名 タイヤ粉塵由来マイクロプラスチックの時空間分布特性及び交通流の影響解明

課題代表者名 酒井 宏治（東京都立大学 准教授）

重点課題 主：【重点課題16】大気・水・土壌等の環境管理・改善のための対策技術の高度化及び評価・解明に関する研究

副：【重点課題6】グローバルな課題の解決に貢献する研究・技術開発

行政要請研究テーマ（行政ニーズ）

（5-5）自動車から排出されるタイヤ粉塵に対する新たな排出量評価法の研究

研究実施期間 令和2年度～令和4年度

研究経費

15,249千円（合計額）

（令和2年度：5,083千円、令和3年度5,083千円、令和4年度：5,083千円）

研究体制

（サブテーマ1）タイヤ粉塵由来マイクロプラスチックの時空間分布特性及び交通流の影響解明
（東京都立大学）

他のサブテーマはない。

研究協力機関

研究協力機関はない。

本研究のキーワード タイヤ粉塵、マイクロプラスチック、交通流、ATR-FTIR、データベース

1. はじめに（研究背景等）

タイヤはマイクロプラスチックの発生源の一つであり、その環境中への排出量のおよそ70%を占める（デンマーク環境保護局、2015）。タイヤを含むマイクロプラスチック粒子は、有害物質を吸着する可能性があり、海洋生物に摂取されうることから、陸域からの排出が問題となっている。タイヤからの排出実態を把握し、適切な対策を取ることが望まれる。

タイヤは、スチレンブタジエンゴム（SBR）、ポリブタジエン（PBD）、天然ゴム（NR）などの高分子を主な素材（40-60%）とし、その他に補強剤としてカーボンブラックやシリカ（20-35%）、オイル（15-20%）などが含まれている（Huffer *et al.*, 2019）。タイヤ由来の粉塵の研究例として、シミュレーターを用いてタイヤを切削した研究や（Dahl *et al.*, 2013, Gustafsson *et al.*, 2008）、走行中のタイヤから粉塵を採取してその粒度分布を調べた研究（Kwak *et al.*, 2013）のほか、環境試料中の粒度分布を調べた研究（Wang *et al.*, 2017）などがある。

だが、タイヤ粉塵について、例えばPM2.5の発生源としての研究事例などはいくつか存在するものの、マイクロプラスチックの発生源という観点から粒度分布と成分を複合的に検討した事例は乏しい。また、それらが実際の路上において時間的あるいは空間的にどのように分布するかについて検討した事例は見当たらない。さらに、実際の路上におけるタイヤ粉塵の発生に影響を及ぼすと考えられる運転者の行動や交通流などの影響は未解明である。

以上のような背景から、本研究では、タイヤ粉塵から発生するマイクロプラスチックについて、その路上での発生状況及び存在状況を明らかにすることとした。

2. 研究開発目的

タイヤ粉塵について、マイクロプラスチックの発生源という観点から粒度分布と成分を複合的に検討した事例は乏しい。また、それらが実際の路上において時間的あるいは空間的にどのように分布するかについて検討した事例は見当たらない。さらに、実際の路上におけるタイヤ粉塵の発生に影響を及ぼすと考えられる運転者の行動や交通流などの影響は未解明である。

そこで本研究では、タイヤ粉塵から発生するマイクロプラスチックを対象とし、実際の路上での発生及び存在状況を明らかにすることを目的とした。さらに、タイヤ粉塵の発生に影響を及ぼすと考えられる交通流との関連を明らかにすることを目的とした。

3. 研究目標

全体目標	タイヤ粉塵から発生するマイクロプラスチックを対象とし、実際の路上での発生及び存在状況を明らかにすると同時に、タイヤ粉塵の発生に影響を及ぼすと考えられる交通流との関連を明らかにすることを目標とする。
サブテーマ1	タイヤ粉塵由来マイクロプラスチックの時空間分布特性及び交通流の影響解明
サブテーマリーダー /所属機関	酒井宏治／東京都立大学
目標	タイヤ粉塵から発生するマイクロプラスチックを対象とし、実際の路上での発生及び存在状況を100個以上の粒子について明らかにすると同時に、タイヤ粉塵の発生に影響を及ぼすと考えられる交通流との関連を解析する。

4. 研究開発内容

【サブテーマ1】タイヤ粉塵由来マイクロプラスチックの時空間分布特性及び交通流の影響解明

本研究は、(1)タイヤ粉塵中のマイクロプラスチック分析手法の確立、(2)交通流データ解析及び分析地点の選定、(3)マイクロプラスチックの分布と交通流の関連性の分析の3つの内容から構成される。具体的な研究開発は、以下の項目1、項目2、項目3で説明する。

【項目1：マイクロプラスチック分析】

タイヤ粉塵中のマイクロプラスチック分析については、最終的に時空間的な分析を行うことを目標としており、それに対応できる試料採取方法を開発する。特に、マイクロプラスチックに関する現在の研究は、全般的に統一された手法が用いられておらず、分析に至るまでの手法が確立されていないことが課題である。本研究では、タイヤ粉塵中のマイクロプラスチックを把握することを目的とした手法の確立を検討した。

最終的な分析及びシミュレーションの目標からすると、試料採取の時間及び空間的な解像度を、できるだけ小さくすることが望ましい。一方で、時間及び空間的な解像度が細かすぎる場合、得られる試料量が少なく、目的とする粉塵を容易に採取できない可能性がある。

また、時空間的な分析を行うためには、多地点における時空間分布を同時に調査する必要がある。そのためには、試料採取を、比較的安価で大量に入手が可能な器具を用い、短時間で容易に、かつ採取器具からのコンタミを抑えて、行うことが望ましい。

そこで、試料採取が容易な大学キャンパス内の道路において、本研究の目的をより達成可能な時間的

及び空間的な試料の採取方法を検討する。

【項目2：交通流データ解析】

道路交通センサスなどのマクロ的な交通流に関するデータを取得する。また、交通流を含む地図データを入手し、より細かな空間解像度における交通流分析のためのデータを取得する。

最終的な分析及びシミュレーションの目標からすると、試料採取の時間及び空間的な解像度を、できるだけ小さくすることが望ましいが、マイクロプラスチック試料の採取の点からは、ある程度粗い解像度で分析を行う必要が生ずる。

そこで、まずマクロ的な分析に主眼を置き、マクロ的な交通量のデータが得られる地点と粉塵調査が可能な地点の照らし合わせを行って、分析地点を選定していく。

【項目3：マイクロプラスチックの分布と交通流の関連性の分析】

マイクロプラスチック分析の視点と、交通流解析の視点から、最終的な目標に向けた時空間的な解像度を照らし合わせて分析地点の候補を選定した分析地点において、まず、マクロ的な解像度でマイクロプラスチックの分布と交通流の関連性を分析する。

すなわち、ネットワークレベルでの交通量が異なる複数の地点を選び、タイヤ粉塵由来のマイクロプラスチックと交通量の関連性をマクロ的に捉える。

マイクロプラスチック分析では、個数、粒径、成分などの情報を明らかにする。交通流分析では、交通流測定地点における日単位の交通量、大型車混入率などの情報を取得する。マイクロプラスチック分析から得られた結果と照らし合わせ、交通流とタイヤ粉塵由来のマイクロプラスチック発生の関係を、マクロ的な時空間スケールにおいて明らかにする。

ミクロ的な解像度での分析では、車両の速度や加減速を考慮したマイクロプラスチックの分布に焦点を当て、空間的な解像度を上げた関連性の分析を行う。そのために分析地点として、同じ道路で加減速が異なると考えられる、交差点からの距離の違う複数の地点を選定する。選定した地点におけるマイクロプラスチックの分析を行うとともに、交通流を把握するシミュレーションのために観測結果に基づいた車両の速度や加減速の分布のデータを収集する。

5. 研究成果

5-1. 成果の概要

【サブテーマ1】タイヤ粉塵由来マイクロプラスチックの時空間分布特性及び交通流の影響解明

【項目1：マイクロプラスチック分析】

(1) 前処理手法の検討

道路粉塵由来のマイクロプラスチック分析について、既存研究の知見及び分析手法の検討のための文献調査を実施した。文献調査等の結果を踏まえ、ゲルマニウムプリズムを用いた顕微FT-IR装置による分析を行うこととした。実際の検討として、学内道路上において複数回試料を採取して分析方法の確立を行った。分析方法の検討においては、試料採取のための装置の選定、採取した試料の前処理方法として、比重分離のための密度溶液の検討、観察において妨害要因となる有機物分解のための手法の検討、観察及び試料ろ過のためのフィルターの選定を行った。

まず、試料採取のための装置の選定としては、掃除機(CL102、マキタ)を用いて採取する方法とした。

次に、比重分離のための検討として、超純水、NaCl 20%溶液(比重約1.15)、KI 35%溶液(比重約1.33)の3種類の溶液を比較した。これは、対象とするマイクロプラスチック素材のものうち、タイヤ粉塵由来のゴム素材のもの(天然ゴム：NR、スチレンブタジエンゴム：SBR、ブタジエンゴム：BR)は比較的

比重が軽いことから、この性質を利用して分離することで、より効率的に対象となるゴム素材の物を分離することを意図した。試験片として、自転車タイヤを用いて密度分離を行ったところ、KI 35%溶液が適切であると判断した。

次に、前処理工程における分解について検討した。これは、対象試料中に存在する微量の有機物を分解する工程であり、より精緻なFTIRスペクトルデータを得ることを目的としている。このために同じくH₂O₂溶液にて1日間の分解とすることとした。

最後に観察及びろ過のためのフィルターの選定について記述する。FTIRでは主に有機物の結合や官能基によって光が吸収されることから、それらに影響を及ぼさないものとして無機性のステンレスメッシュフィルターを用いることと、粒径区分については、100 μ mを中心として、105 μ m、40 μ m、10 μ mでろ過を行うこととした。

(2) 観察手法の検討

試料の観察には顕微FTIR(Perkin Elmer)を用いた。FTIRは試料のスペクトルを計測し、それをデータベースと比較することで物質の特定が可能である。本研究ではATR法を用いて測定を行った。ATR法はクリスタルと試料を接触させた後、クリスタル内部を透過させた赤外光を、試料との界面にて全反射させる。この全反射の際に、試料側へ潜り込む赤外光を検出することで、試料のスペクトルを取得することができる仕組みとなっている。

観察においては、顕微FT-IR装置に備えられているデータベースの他、実タイヤを切削して顕微FT-IR装置にて取得したスペクトルを加えることで、観察の精度の向上を図った。

【項目2：交通流データ解析】

(1) 年間平均日交通量分布および試料採取日交通量の推定

関東エリア全体の年間平均日交通量の分布図を道路交通センサスデータから作成し、試料採取場所の検討に用いた。また、試料採取場所において、実際に直近1時間程度の交通量を観測することで、試料採取日の交通量を把握し、年間平均日交通量から求めた値と乖離していないかの確認を行った。

(2) 加減速についての検討

試料採取場所における加速度分布については、一般的な知見から加速度の分布がどのような範囲で観測されるか事前検討を行った。この検討結果を、実際に観測・算出される加速度の値が妥当な範囲であるか、もしくは何らかのバイアスがかかっているのかの判別に応用した。

(3) ビデオ観測からの加速度分布抽出手法の検討

試料採取を行った多摩市乞田において、複数台のビデオカメラを用いたビデオ観測を行い、車両軌跡の一部を抽出することで、加速度の分布の把握を試みた。車両軌跡の抽出では、まず専用のアプリケーションで車両のカメラ画像座標を取得し、次に道路上に座標を設定し、カメラ画像座標との写像変換パラメータを求め、実際の車両軌跡を算出した。取得した車両軌跡の時間微分を計算することで、加速度分布を把握した。

(4) Webアプリを用いた車両挙動解析手法の検討

ビデオ観測から求めた加速度分布の精度向上のために、目視で通過時間と通過時の速度が把握可能なHTMLベースのWebアプリを開発し、試料採取を行った亀戸2丁目交差点における、当該アプリを用いた車両挙動解析データの取得を行った。実際に交差点上流において観測を実施するとともに、アプリの精度確認及び観測者によるバイアスの把握のためのデータ取得と分析を行った。

【項目3：マイクロプラスチックの分布と交通流の関連性の分析】

(1) 直線走行区間における検討

① 調査地点の概要

計4回にわたり、3地点、延べ19か所でサンプリングを実施した。直線走行区間におけるサンプリングは、2021年3月9日、4月27日、7月20日、10月8日の計4回行った。道路交通センサスによる交通量は約10000台～26000台の所を選択した。その他の条件として、法定速度、先行晴天日数、停止線からの距離

などの条件を併せて記した。

② 調査結果

MPs数の結果は図-1.11に示した通りである。粒径別にみると、105 μ m以上の粒子径が一番多く占めており、全体のMPs数の傾向と沿うような結果が得られた。一方で、105 μ m以下の粒子径に関しては調査番号4の右車線30mや50m、調査番号5の右車線30mの3地点を除けばすべて9個から16個の範囲内に収まっている。加えて調査番号4の右車線70mと調査番号5の左車線50mの2地点を除けば10~14個の範囲内に分布していることが明らかになった。

③ 考察

交通量とMPs数の関係をまとめた。調査番号1の南大沢の結果と調査番号2の乞田の結果を比較すると、同日にサンプリングを実施し、交通量は八王子市南大沢5丁目で17376〔台/日〕、多摩市乞田で26033〔台/日〕となっている。このことから、交通量が1.5倍になるとMPsは13個から17個に増加し、約1.3倍にMPs数が増えるという結果になり、交通量とMPsの関連性は少なからずあると推察された。

同様に、調査番号4の乞田の結果と調査番号5の馬引沢の結果を比較すると、乞田では先行晴天日数が4日で交通量は26033〔台/日〕、馬引沢では先行晴天日数が5日で交通量は11673〔台/日〕となっており、馬引沢のほうが乞田よりも先行晴天日数が1日多く交通量は半分以下というサンプリング条件であった。この2地点のサンプリング結果を見ると、サンプリングを行った7か所すべてのMPs数の合計が乞田は250個、馬引沢は183個になっており、馬引沢より乞田のほうがMPs数は多い結果となり先行晴天日数は短いものの交通量の影響でMPsが多くなったと考えられる。以上から、交通量がMPs数に影響することが示唆された。

車両挙動との関連分析については、交通工学で用いられているジレンマゾーンの知見を主に参考にして分析を行った。ジレンマゾーンとは、信号が黄色に変わったとき、そのときの走行速度と停止線までの距離の関係で、そのまま進むべきか停止するべきかという迷いが生まれる一帯のことを指す。

まず、調査番号3と4の結果について考察する。サンプリングした都道158号線は法定速度が60km/hと定められていることから、60km/hで走行していると仮定した。この場合は、黄信号開始時の停止線まで

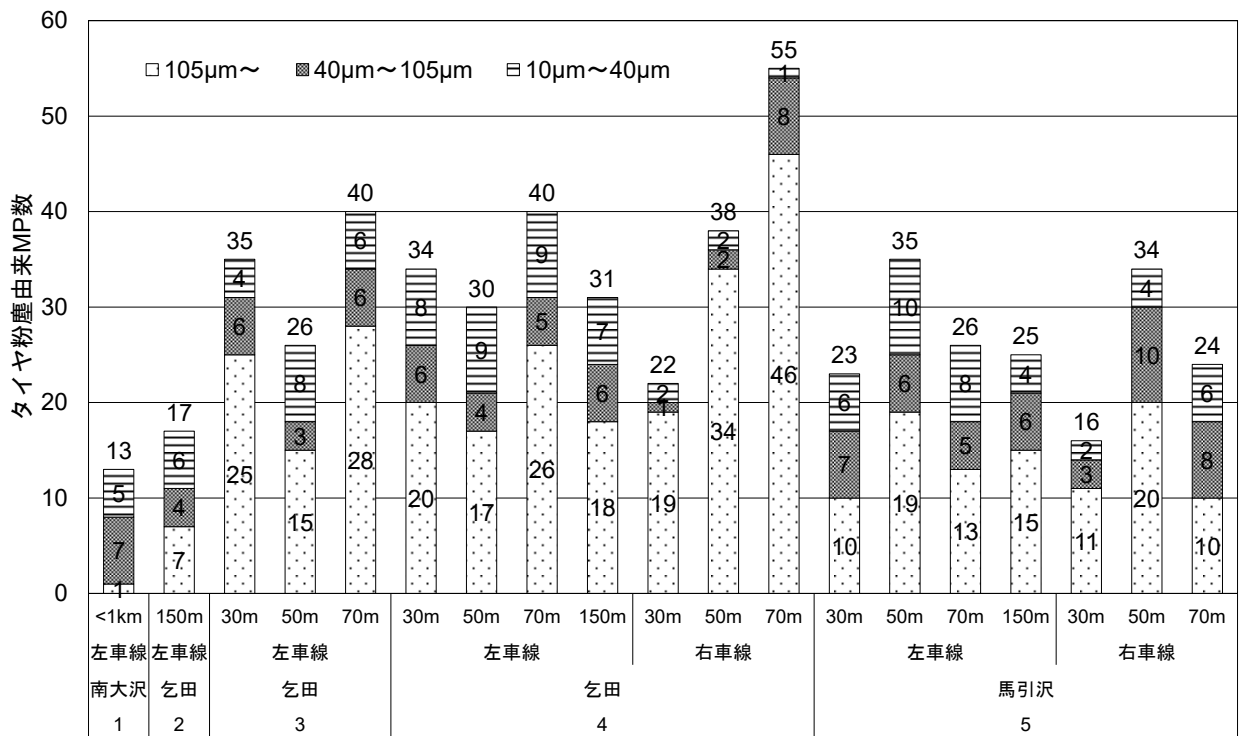


図-1.11 直線走行区間におけるタイヤ粉塵由来MP数

の距離が0～50m以内の場合は通過、60mより離れている場合は停止の挙動を起こしやすく、迷いなく走行できると考えられている。よって今回の場合は、70mでは停止が主な挙動と考えられ、50mや30mでは通過する車が大半を占めると想定される。結果として、左車線では70m地点でMPs数が多くっており、70m>30m>50mの順となった。

続いて右車線の結果を見ると、左車線と同様70mで最も多いことは変わらないが、70m>50m>30mの順に多い結果となり、50mと30mの傾向で違いが生じた。この原因としては、乞田の左車線と右車線で交通量に差があることが考えられる。左車線にバス停があることや右折車が多くいることから、右車線に車両が集中し、全体の走行速度が落ちていることが予想され50m付近でも停止挙動を起こす車両が多かったことが推察される。MPs数も左に比べて多く、ここでも交通量の差が影響しているものと考えられる。

以上から、乞田と馬引沢の結果から停止挙動を起こす範囲内の中でも停止線までの距離が近い地点でブレーキが強くはたらき、MPs数を増大させている要因の一つであることが示唆された。

(2) 曲線走行区間における検討

① 調査地点の概要

サンプリングは東京都八王子市別所の小山乞田線(都道158号線)と町田平山八王子線(都道155号線)の交差点内のUターン路の曲線部で行った。交差点付近で測定された都道158号線の該当交差点付近の交通量は、23800台/日である。現地で一定時間の車の進入量を観測したところUターン路の交通量は1000~2000台/日と推定した。

Uターン路における道路形状であるが、道路構造令により曲線道路には緩和区間が設けられている。そのことを考慮し、緩やかに減速する緩和区間内(a)、最も半径が小さくなる部分(b)、曲線から直線へと移り変わる(c)の3地点で、内輪と外輪に分けて計6地点のサンプリングを行った。

② 調査結果及び考察

観測結果の個数を図-1.16に示した。緩やかに減速する緩和区間内(a)では合計279個、最も半径が小さくなる部分(b)では合計850個、緩やかに加速する緩和区間内(c)では合計482個となった。よって、b>c>aの順にタイヤ粉塵由来と推定されるMPsの数が多い結果、各地点で外輪より内輪の方がタイヤ粉塵由来と推定されるMPsが多い結果となった。

内輪と外輪を比較した時、内輪の方が

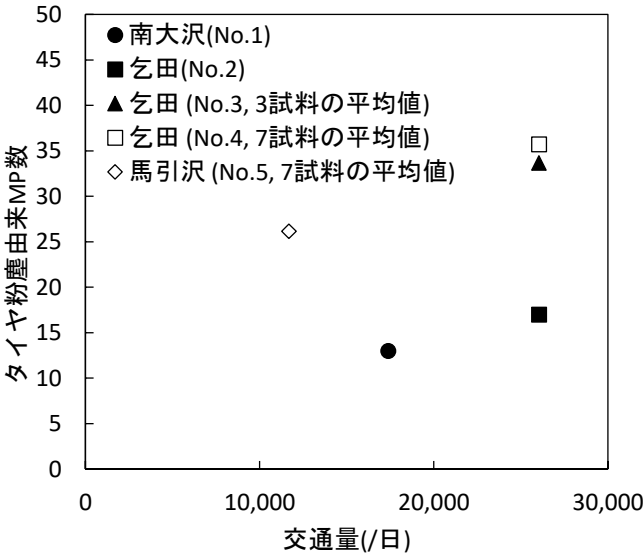


図-1.12 交通量と粒子数の関係

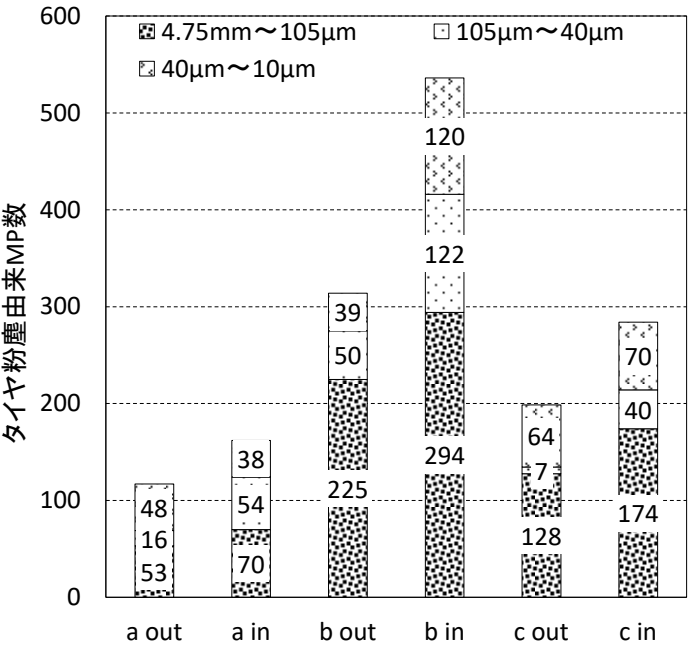


図-1.16 曲線走行区間におけるタイヤ粉塵由来MP数

曲線半径は小さくなるため、3地点すべてで内輪の方がより多くのMPsの検出量が多かったと考えられる。3地点を比べても最も曲率が高く曲線半径は小さくなるb地点は他の2地点に比べて圧倒的に検出量が多かったのも妥当であると考ええる。

以上から、曲線半径が小さくなるほどタイヤと路面との間に発生する摩擦力が大きくなるためMPsの増大に寄与することが示唆された。

(3) 複合走行区間(交差点)における検討

① 調査地点の概要

交差点内の車両挙動に着目し、サンプリング地点を選定した。場所はJR総武線亀戸駅北口の明治通りで行った。具体的には、明治通り内回り方向第2車線において、交差点内の4箇所に加え、停止線直後とその手前の直線部分の計6か所でサンプリングを実施した。なお、先行晴天日数は3日であった。

② 調査結果及び考察

調査結果について、各サンプリング地点のMPs数[個]を実際の交通量[台/日]で除して交通量あたりのMPs数[個/台/日]を算出し、これら実際の交通量と交通量あたりのMPs数をまとめて比較するグラフを図-1.20に図示した。その結果、交通量あたりのMPs数でも亀戸①②③が亀戸④⑤⑥に比べ2倍程度多く、交差点内で複数車線が交わる地点のMPs数が増える要因として交通量の増加だけではなく、車両のカーブや減速、加速でタイヤの摩擦が増えたことが影響していると示唆された。なお、この点に関連して、採取地点で採取した試料の粒径分布の割合を算出し、それを亀戸①②③と亀戸④⑤⑥の2グループに分けて統計的に解析した。しかしながら、粒径分布の割合について、両グループ間には有意な差は見られなかった。

以上より、交差点内のMPs数に着目したところ、特に交差点内の他車線からの車両と交わる地点のMPs数が直線に比べ2倍以上多かった。この要因が交通量によるものか判断するために各サンプリング地点の交通量あたりのMPs数を算出したが、同様に交差点内のサンプリング地点が多かったため交通量に関わらず交差点内のMPs数が増えることが示された。

(4) まとめ

以上、見てきた通り、直線走行区間では主に交通量に比例すること、加減速によって追加的に排出されること、曲線走行では台数当たり排出量が増加すること、複合走行区間(交差点)では、曲線走行に伴う台数当たり排出量の増加によって排出量が増加することなどが分かった。従って、交差点付近を重点的に清掃することで、排出量の低減につながると期待される。

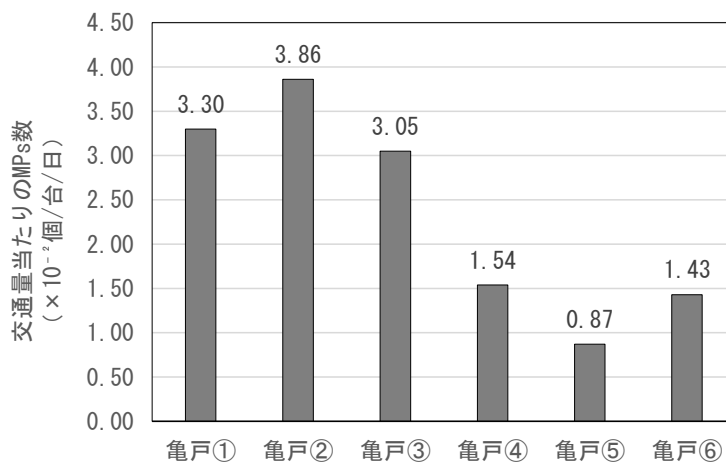


図-1.20 交通量あたりのタイヤ粉塵由来MP数

5-2. 環境政策等への貢献

<行政等が活用することが見込まれる成果>

【サブテーマ1】タイヤ粉塵由来マイクロプラスチックの時空間分布特性及び交通流の影響解明

いくつか活用が見込まれる成果があり、以下に列挙する。

① タイヤ粉塵由来マイクロプラスチックの測定に関する精度向上の方策について、以下の知見が挙げられる。FTIR装置に内蔵されているデータベースのみでは、タイヤの判別、素材の判定が難しい可能性があること、用いる検出器の特性に合わせたデータベースを準備する必要があることが分かってきた。そこで、FTIRスペクトルのデータベースを充実させることにより、さらなる精度向上が見込まれる。

② タイヤ粉塵由来マイクロプラスチックの生成に関する交通の影響について、以下の知見が挙げられる。直線走行区間では主に交通量に比例すること、加減速によって追加的に排出されること、曲線走行では台数当たり排出量が増加すること、複合走行区間(交差点)では、曲線走行に伴う台数当たり排出量の増加によって排出量が増加することなどが分かった。従って、交差点付近を重点的に清掃することで、排出量の低減につながると期待される。

5－3．研究目標の達成状況

全体目標	目標の達成状況
タイヤ粉塵から発生するマイクロプラスチックを対象とし、実際の路上での発生及び存在状況を明らかにすると同時に、タイヤ粉塵の発生に影響を及ぼすと考えられる交通流との関連を明らかにすることを目標とする。	<u>目標どおりの成果をあげた。</u> タイヤ粉塵由来マイクロプラスチックを測定する手法を開発し、実際の路上におけるサンプリングへ適用した。 発生及び存在状況を明らかにするとともに、交通流の影響として、道路の制限速度、停止線からの距離、曲線走行について検討した。さらに、それらの影響が複合する交差点において試料採取を行い、曲線走行による影響が卓越することを示した。 以上の通り、目標どおりの成果をあげた。
サブテーマ1目標	目標の達成状況
タイヤ粉塵から発生するマイクロプラスチックを対象とし、実際の路上での発生及び存在状況を100個以上の粒子について明らかにすると同時に、タイヤ粉塵の発生に影響を及ぼすと考えられる交通流との関連を解析する。	<u>目標を上回る成果をあげた。</u> タイヤ粉塵由来マイクロプラスチックを測定する手法を開発し、実際の路上におけるサンプリングへ適用した。 実際の路上での発生及び存在状況について、100個を大幅に上回る数の粒子を観察・同定した。これは、目標とする地点数を適切に確保したのみならず、既存研究と比較して面積あたり粒子数が多い結果を得たためである。この要因としては、観察・同定手法に改良を加えたこと、既存研究では実施していない曲線走行区間で試料採取を行ったためである。特に手法の改良を行ったことで目標を上回る結果につながったといえる。 交通流の影響として、道路の制限速度、停止線

	からの距離、曲線走行について検討した。さらに、それらの影響が複合する交差点において試料採取を行い、曲線走行による影響が卓越することを示した。こちらは、計画通りに遂行することで目標を達成したと言える。 以上の通り、目標を上回る成果をあげた。
--	---

6. 研究成果の発表状況

6-1. 査読付き論文

<件数>

2件

<主な査読付き論文>

※「Ⅲ. 研究成果の発表状況の詳細」に記載されている中から当課題に関連の深い査読付き論文を10件まで選んで記載してください。

- 1) Gaku Oyama, Masami YANAGIHARA, Hiroshi SAKAI (2023) Occurrence of Tire-derived Microplastics at a Curvilinear Road Section, Journal of Environment and Safety, (accepted)
- 2) Chisato NISHIMAGI, Masami YANAGIHARA, Yiming FANG, Hiroshi SAKAI (2023) Occurrence of Tire-Derived Microplastics (TMPs) Focusing on Driving Behavior, H2Open Journal (accepted)

6-2. 知的財産権

特に記載すべき事項はない。

6-3. その他発表件数

査読付き論文に準ずる成果発表	0件
その他誌上発表（査読なし）	0件
口頭発表（学会等）	3件
「国民との科学・技術対話」の実施	1件
マスコミ等への公表・報道等	0件
本研究費の研究成果による受賞	0件
その他の成果発表	1件

7. 国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない。

8. 研究者略歴

研究代表者

酒井 宏治

東京大学大学院工学研究科修了、博士（工学）、現在、東京都立大学都市環境学部准教授

研究分担者

柳原 正実

京都大学大学院工学研究科修了、博士（工学）、現在、東京都立大学都市環境学部助教

Ⅱ．成果の詳細

Ⅱ－１ タイヤ粉塵由来マイクロプラスチックの時空間分布特性及び交通流の影響解明

東京都立大学 都市環境学部

都市基盤環境学科 水・環境工学研究室 准教授

都市基盤環境学科 交通計画研究室 助教

酒井宏治

柳原正実

〔要旨〕

タイヤ粉塵から発生するマイクロプラスチックを対象とし、実際の路上での発生及び存在状況を明らかにすることを目的とした。さらに、タイヤ粉塵の発生に影響を及ぼすと考えられる交通流との関連を明らかにすることを目的とした。内容として、(1)タイヤ粉塵中のマイクロプラスチック分析手法の確立、(2)交通流データ解析及び分析地点の選定、(3)マイクロプラスチックの分布と交通流の関連性の分析の3つの内容について検討した。それらの検討結果として、直線走行区間では主に交通量に比例すること、加減速によって追加的に排出されること、曲線走行では台数当たり排出量が増加すること、複合走行区間(交差点)では、曲線走行に伴う台数当たり排出量の増加によって排出量が増加することなどが分かった。従って、交差点付近を重点的に清掃することで、排出量の低減につながると期待されることなどを明らかにした。

1. 研究開発目的

タイヤ粉塵から発生するマイクロプラスチックを対象とし、実際の路上での発生及び存在状況を明らかにすることを目的とした。さらに、タイヤ粉塵の発生に影響を及ぼすと考えられる交通流との関連を明らかにすることを目的とした。

2. 研究目標

タイヤ粉塵から発生するマイクロプラスチックを対象とし、実際の路上での発生及び存在状況を100個以上の粒子について明らかにすると同時に、タイヤ粉塵の発生に影響を及ぼすと考えられる交通流との関連を解析する。

3. 研究開発内容

【サブテーマ1】タイヤ粉塵由来マイクロプラスチックの時空間分布特性及び交通流の影響解明

本研究は、(1)タイヤ粉塵中のマイクロプラスチック分析手法の確立、(2)交通流データ解析及び分析地点の選定、(3)マイクロプラスチックの分布と交通流の関連性の分析の3つの内容から構成される。具体的な研究開発は、以下の項目1、項目2、項目3で説明する。

【項目1：マイクロプラスチック分析】

タイヤ粉塵中のマイクロプラスチック分析については、最終的に時空間的な分析を行うことを目標としており、それに対応できる試料採取方法を開発する。特に、マイクロプラスチックに関する現在の研究は、全般的に統一された手法が用いられておらず、分析に至るまでの手法が確立されていないことが課題である。本研究では、タイヤ粉塵中のマイクロプラスチックを把握することを目的とした手法の確立を検討した。

最終的な分析及びシミュレーションの目標からすると、試料採取の時間及び空間的な解像度を、できるだけ小さくすることが望ましい。一方で、時間及び空間的な解像度が細かすぎる場合、得られる試料量が少なく、目的とする粉塵を容易に採取できない可能性がある。

また、時空間的分析を行うためには、多地点における時空間分布を同時に調査する必要がある。そのためには、試料採取を、比較的安価で大量に入手が可能な器具を用い、短時間で容易に、かつ採取器具

からのコンタミを抑えて、行うことが望ましい。

そこで、試料採取が容易な大学キャンパス内の道路において、本研究の目的をより達成可能な時間的及び空間的な試料の採取方法を検討する。

【項目2：交通流データ解析】

道路交通センサスなどのマクロ的な交通流に関するデータを取得する。また、交通流を含む地図データを入手し、より細かな空間解像度における交通流分析のためのデータを取得する。

最終的な分析及びシミュレーションの目標からすると、試料採取の時間及び空間的な解像度を、できるだけ小さくすることが望ましいが、マイクロプラスチック試料の採取の点からは、ある程度粗い解像度で分析を行う必要が生ずる。

そこで、まずマクロ的な分析に主眼を置き、マクロ的な交通量のデータが得られる地点と粉塵調査が可能な地点の照らし合わせを行って、分析地点を選定していく。

【項目3：マイクロプラスチックの分布と交通流の関連性の分析】

マイクロプラスチック分析の視点と、交通流解析の視点から、最終的な目標に向けた時空間的な解像度を照らし合わせて分析地点の候補を選定した分析地点において、まず、マクロ的な解像度でマイクロプラスチックの分布と交通流の関連性を分析する。

すなわち、ネットワークレベルでの交通量が異なる複数の地点を選び、タイヤ粉塵由来のマイクロプラスチックと交通量の関連性をマクロ的に捉える。

マイクロプラスチック分析では、個数、粒径、成分などの情報を明らかにする。交通流分析では、交通流測定地点における日単位の交通量、大型車混入率などの情報を取得する。マイクロプラスチック分析から得られた結果と照らし合わせ、交通流とタイヤ粉塵由来のマイクロプラスチック発生の関係を、マクロ的な時空間スケールにおいて明らかにする。

ミクロ的な解像度での分析では、車両の速度や加減速を考慮したマイクロプラスチックの分布に焦点を当て、空間的な解像度を上げた関連性の分析を行う。そのために分析地点として、同じ道路で加減速が異なると考えられる、交差点からの距離の違う複数の地点を選定する。選定した地点におけるマイクロプラスチックの分析を行うとともに、交通流を把握するシミュレーションのために観測結果に基づいた車両の速度や加減速の分布のデータを収集する。

4. 結果及び考察

【サブテーマ1】タイヤ粉塵由来マイクロプラスチックの時空間分布特性及び交通流の影響解明

【項目1：マイクロプラスチック分析】

(1) 分析手法の検討

道路粉塵由来のマイクロプラスチック分析について、既存研究の知見及び分析手法の検討のための文献調査を実施した。文献調査等の結果を踏まえ、ゲルマニウムプリズムを用いた顕微FT-IR装置による分析を行うこととした。なお、結果の整理の都合上、ここでは、分析法の検討についてのみ述べ、実際の道路上でのサンプリング結果については、項目3に集約して報告する。

実際の検討として、学内道路上において複数回試料を採取して分析方法の確立を行った。分析方法の検討においては、試料採取のための装置の選定、採取した試料の前処理方法として、比重分離のための密度溶液の検討、観察において妨害要因となる有機物分解のための手法の検討、観察及び試料ろ過のためのフィルターの選定を行った。まず、試料採取のための装置の選定としては、既存の研究¹⁾を参考に、掃除機(CL102、マキタ)を用いて採取する方法とした。

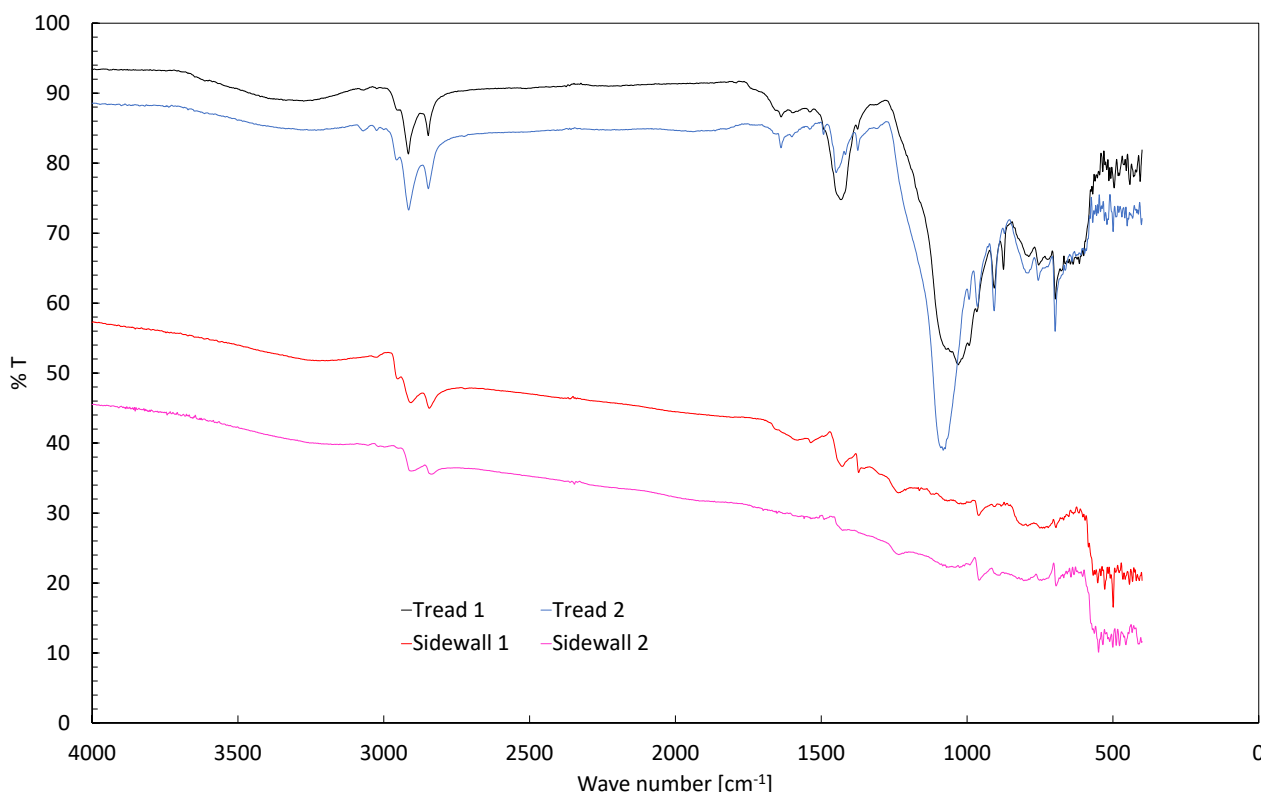


図-1.1 本研究で追加したタイヤのFTIRスペクトル

次に、比重分離のための検討として、超純水、NaCl 20%溶液(比重約1.15)、KI 35%溶液(比重約1.33)の3種類の溶液を比較した。これは、対象とするマイクロプラスチック素材のものうち、タイヤ粉塵由来のゴム素材のもの(天然ゴム：NR、スチレンブタジエンゴム：SBR、ブタジエンゴム：BR)は比較的比重が軽いことから、この性質を利用して分離することで、より効率的に対象となるゴム素材の物を分離することを意図したものである。しかしながら、自転車タイヤをカットして粉末状にしたサンプルを用いて密度分離を行ったところ、超純水ではすべて沈み、NaCl 20%溶液では沈んだものが大半を占め、KI 35%溶液では浮いた。従って、自転車タイヤ粉塵由来のMPsの比重は1.15～1.33未満であると推測される。これは、タイヤ素材として、NR、SBR、BRなどが用いられているものの、タイヤとして加工する段階でシリカやカーボンブラックなどの配合剤を用いることから、比重がより大きくなっているものと考えられる。なお、本実験は検討の初期段階において自動車タイヤを入手する以前に行ったため自転車用タイヤを用いたが、自転車用タイヤでも、トレッド部分の材質は主に天然ゴムとスチレンブタジエンゴムであり、配合剤もカーボンブラックやシリカである。このことから、自動車用タイヤではないものの同等の結果が得られると判断し、ヨウ化カリウム水溶液(35%)を用いることとした。

次に、前処理工程における分解について検討した。これは、対象試料中に存在する微量の有機物を分解する工程であり、より精緻なFTIRスペクトルデータを得ることを目的としている。このために同じく既存研究¹⁾を参考にしながら、H₂O₂溶液にて1日間、もしくは1週間分解する方法を比較検討した。その結果図-1.1のようなスペクトルを得ることができ、前処理なしと前処理ありを比較すると全体的な波形に違いが見られること、一方で、1日間と1週間では、7倍の時間をかけるほどの効果は見られないこと、から1日間の分解とすることとした。

最後に観察及びろ過のためのフィルターの選定について記述する。フィルターの選定においては素材及び粒径の選定が重要となる。まず、素材については、FTIR装置において測定の手障とならない素材を選定する必要がある。FTIRでは主に有機物の結合や官能基によって光が吸収されることから、それらに影響を及ぼさないものとして無機性のステンレスメッシュフィルターを用いることとした。粒径区分については、既報²⁾を参考に、100μmを中心として分析することとした。また、本研究で用いた装置は、

観察窓のサイズが100 μm 四方であることから、それに最も近い市販のフィルターのサイズとして105 μm を最大の孔径として用いた。次に、10 μm ～105 μm をある程度均等に区分するために、40 μm の孔径を次点として用いることとした。最後に、10 μm のフィルターを用いた。これより細かな粒径では大気中への散逸が主体となると考えられることから下限を設定した。

以上のような検討の結果、比重分離のための密度溶液として、ヨウ化カリウム溶液が適していること、前処理条件として過酸化水素にて1日間分解させる方法で精度が向上すること、観察及び試料ろ過のためのフィルターとして、ステンレスメッシュのフィルターが適していることなどを確認し、分析の手順を確立した。

本研究ではタイヤ粒子のみを扱うことに焦点を当てている為、ヨウ化カリウム水溶液(35%)を用いた密度分離法で6時間程度静置させることでタイヤ粉塵を浮上させ、分離後オーバーフローで上澄み部分を分離した。分離した上澄みは1Lのビーカーに入れ、超純水を添加した。そこへ、過酸化水素水(30%)を約100mL加え、55 $^{\circ}\text{C}$ の条件下で30分有機物分解を行った後、常温に戻したうえで24時間攪拌することで分解を続けた。分解後、吸引ろ過装置を用いて濾過を行った。濾過後に直接観察が可能なステンレスメッシュフィルター(モスフィル)を用いた。なお、MPsは粒径が様々なものがあると考えられるため、10 μm ～40 μm 、40 μm ～105 μm 、105 μm ～4.75mm粒径に試料を区分した。

試料の観察には顕微FTIR(Perkin Elmer)を用いた。FTIRは試料のスペクトルを計測し、それをデータベースと比較することで物質の特定が可能である。本研究ではATR法を用いて測定を行った。ATR法はクリスタルと試料を接触させた後、クリスタル内部を透過させた赤外光を、試料との界面にて全反射させる。この全反射の際に、試料側へ潜り込む赤外光を検出することで、試料のスペクトルを取得することができる仕組みとなっている。

(2) 実タイヤを用いた分析精度の向上

これらの手法を用いて、学内道路にて試料を採取し、分析を行った。学内道路にて採取した試料については、主に密度分離液の比重設定や過酸化水素水添加による有機物分解の条件設定に用いた。加えて、自動車整備工場を通じて廃タイヤを入手し、それを切削した断片を観察することで分析手法についての検討を行った。観察においては、顕微FT-IR装置に備えられているデータベースの他、実タイヤを切削して顕微FT-IR装置にて取得したスペクトルを加えることで、観察の精度の向上を図った。この過程で、分析の課題として以下のことが分かった。

まず、実タイヤを分析して顕微FT-IR装置に備えられているデータベース(Know It All, サドラー)と照合した場合、必ずしもタイヤ、あるいはゴムと判定されるわけではないことが分かった。具体的には例えば、実タイヤを切削した試料について、データベースの中の物質としては、Poly(α Vinyl Chloride), Poly (1-Chloro Deuteroethylene)との相関が最も高い(0.56)ことから、Polyと判定されている。従って、単純なデータベースとの照合だけではなく、実タイヤスペクトルとの比較を行って判定する必要があることが分かった。

次に、実タイヤとのスペクトルを比較する上で、波数範囲によっては、スペクトルの振幅が大きくなることが分かった。実タイヤスペクトルで、特に赤丸で囲った400～750[cm^{-1}]の部分においては振幅が大きく、この範囲の振幅が相関係数の算出に影響を与えることが分かった。

さらに、得られる粒子の個数にも左右されるが、膜面上に存在する全ての粒子に対して手動で赤外光を照射して分析するため、口径25mmの膜面全体を観察するのにおよそ8時間前後を要する。従って、1人で分析を行う場合、1日以上を要することが多い。このため、作業の効率化が必要であることが分かった。

そこで、分析及び観察手法の改善として、以下の形で行うこととした。

- ・タイヤ粉塵は黒色であるため、観察の上で黒色粒子のみに注目することで、観察を効率化した。
- ・各種スペクトルとの比較によるコンペア機能による識別によって相関係数を比較し、それが0.4以上である場合にタイヤと判定した。その際の比較対象として、タイヤのトレッド及びサイドウォールからの試料4種及びデータベースに含まれているゴム試料との比較を行い、いずれかの試料との相関係数が

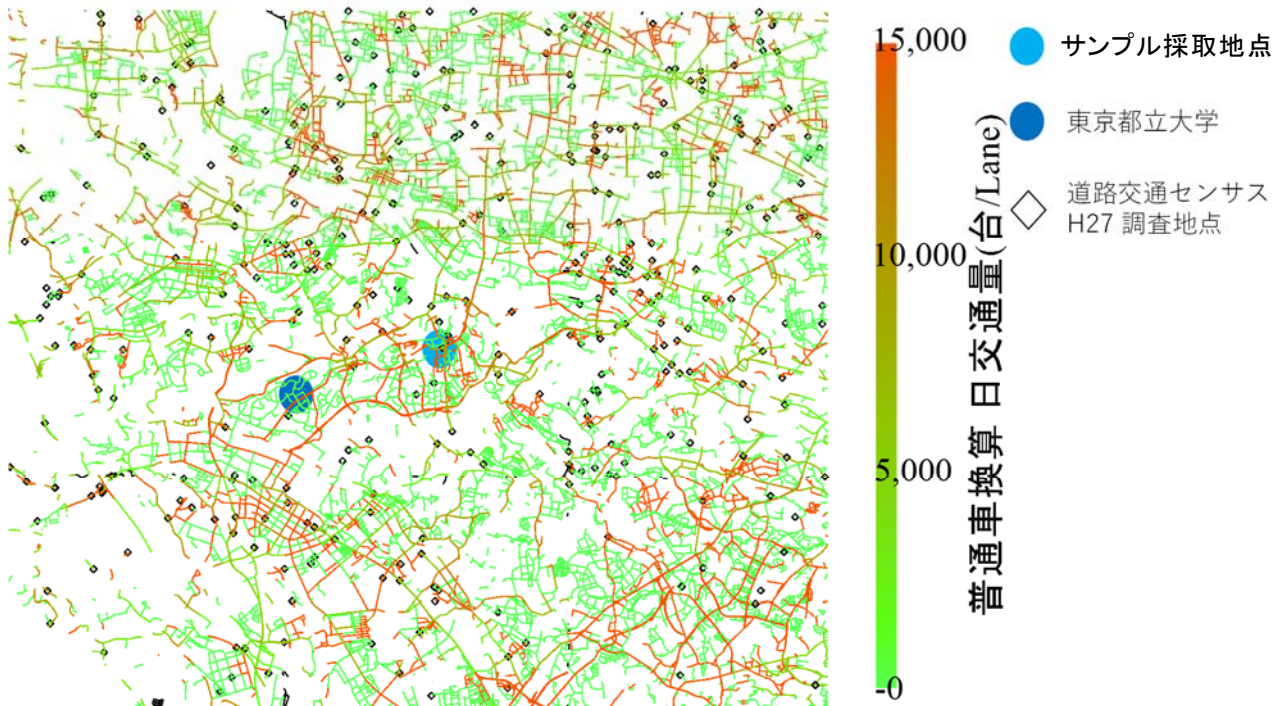


図-1.2 大学近傍のサンプル採取地点におけるネットワーク交通量の算定結果

0.4以上である場合にはタイヤと判定した。

【項目2：交通流データ解析】

(1) 年間平均日交通量分布および試料採取日交通量の推定

交通流データ解析については、まずマクロ的な交通流に関するデータを取得し、サンプル採取地点の選定のための情報を提供することを目的とした。解析地点の選定のため、道路交通センサスのデータを基に年間平均日単位交通量を把握し、その多寡に応じて数段階の交通量のサンプル採取地点候補を選定した。

このうち、中程度の交通量でかつ大学近傍における採取地点についての事例を以下に示す。図-1.2は、道路交通センサスの日交通量を普通車換算（大型車=1.8台）し、道路ネットワーク上で簡易的な配分を行った結果である。

この結果、図-1.2に示した通り、調査地点である都道158号(小山乞田線、通称多摩ニュータウン通り)および、都道18号(府中町田線、通称鎌倉街道)への交通量について普段から十分な交通量があることが確認できた。

次に、実際のサンプル採取時において交通量を計測し、道路交通センサスデータと実測値の比較を行った結果を見ると、道路交通センサスの結果(1車線あたり約13000台)と大きな乖離は見られなかった。一方で、道路交通センサスの調査年度(H27)よりもわずかに減少しており、調査時期には全体的に交通量が減少している可能性が示された。

(2) 加減速についての検討

文献調査により、ミクロ交通流シミュレーションで広く用いられる車両の加減速モデルの整理を行った。ミクロ交通流シミュレーションで用いられる加減速モデルにおける衝突または停止に必要な最小の減速度は、 $a_{min} = \Delta v^2 / 2\Delta x$ であり、表-1.1のような値をとる。表-1.2のような一般的なすべり摩擦係数の値を考慮すると、停止線直前での停止は困難であることが把握できる。これらの値を参考に、実際の観測データより得られた加速の特性を把握する。

表-1.1 各速度と停止距離における停止に必要な減速度

速度\停止距離	10m	20m	30m	40m	50m	60m	70m
5 m/s (18 km/h)	1.25	0.63	0.42	0.31	0.25	0.21	0.18
10 m/s (36 km/h)	5.00	2.50	1.67	1.25	1.00	0.83	0.71
15 m/s (54 km/h)	11.25	5.63	3.75	2.81	2.25	1.88	1.61

表-1.2 一般的な路面とタイヤ間のすべり摩擦係数および実現可能な減速度

路面状態	すべり摩擦係数値 (無次元)	最大減速度 (m/ss)
舗装路 (乾燥)	0.8	7.84
舗装路 (湿潤)	0.6 ~ 0.4	5.88~3.92
積雪路 (新雪)	0.5 ~ 0.35	4.9~3.43
積雪路 (圧縮)	0.35 ~ 0.2	3.43~1.96
氷結路	0.2 ~ 0.1	1.96~0.98

(3) ビデオ観測からの加速度分布抽出手法の検討

多摩市乞田において、2021年4月27日、7月20日に試料採取を行う直前に複数台のビデオカメラを用いたビデオ観測を行った。これらのビデオカメラ映像から車両軌跡の一部を抽出することで、加速度の分布の把握を試みた。具体的には、まず専用のアプリケーションで車両のカメラ画像座標を取得し。次に道路上に設定した座標と、カメラ画像座標との写像変換パラメータを求め、図-1.3、図-1.4のような実際の車両軌跡を算出した。取得した車両軌跡の時間微分を計算することで、図-1.5、図-1.6のように速度分布を把握した。これらの図より、全体的な速度は停止線に近いほど小さい値として得られており、実現象との矛盾のないデータであることがわかる。また、これらの速度をさらに時間微分することによって、加速度の値を算出した。その結果は【項目3】において試料採取の結果とともに示す。

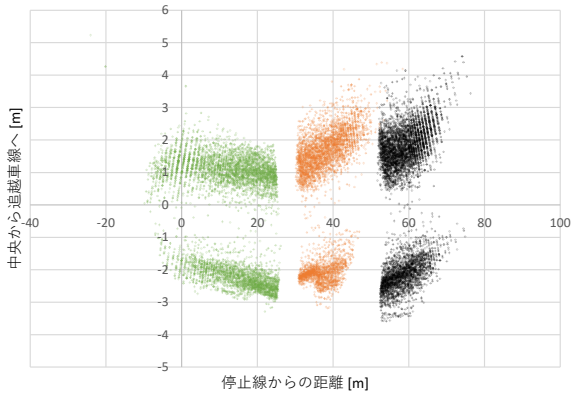


図-1.3 車両平面軌跡 (2021年4月27日)

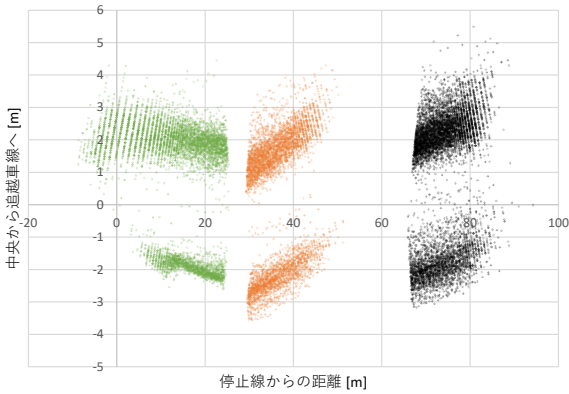


図-1.4 車両平面軌跡 (2021年7月20日)

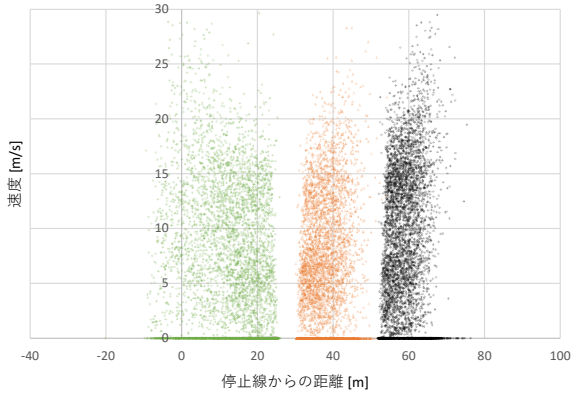


図-1.5 車両速度分布（2021年4月27日）

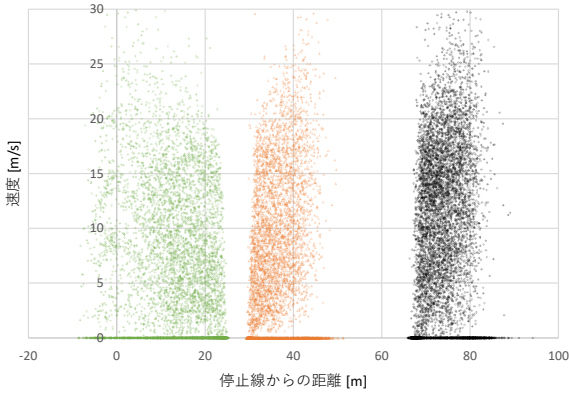


図-1.6 車両速度分布（2021年7月20日）

(4) Webアプリを用いた車両挙動解析手法の検討

ビデオ観測から抽出した加速度の値は、ビデオの画角の制限により、加速度を高い精度で広範囲にわたって抽出する点については課題があった。そこで、より簡易的に速度と加速度を観測するツールとして、HTML&JavaScriptベースのWebページ上で動作する交通計測アプリを開発し、AWS(Amazon Web Service)上に配置することで多数のデバイスで同時に動作させることを可能にした。さらに亀戸2丁目交差点における試料採取の直前に当該ツールの試用を行った。当該ツールは、図-1.7のように方向別・車両種別毎に画面をタップすることで通過時間を記録するものであり、特定2断面の通過時間をタップ開始と終了時刻に結びつけることで速度の計測も可能にしている。図-1.8は複数の観測者が同一の状況に対して速度の観測を行った結果であり、観測者の違いによる計測結果へのバイアスの影響を示している。一部の観測者では、速度が大きく計測されてしまうものの、観測者間の計測速度には概ね全て正の相関があり、簡易的な方法としてはある程度信頼できる速度の観測ができたといえる。

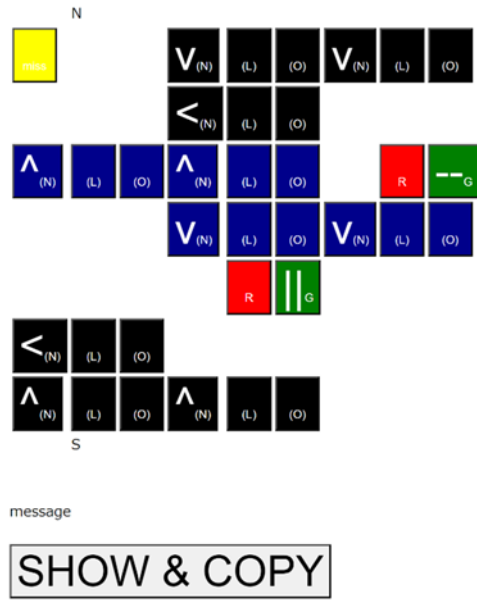


図-1.7 交通計測アプリ画面

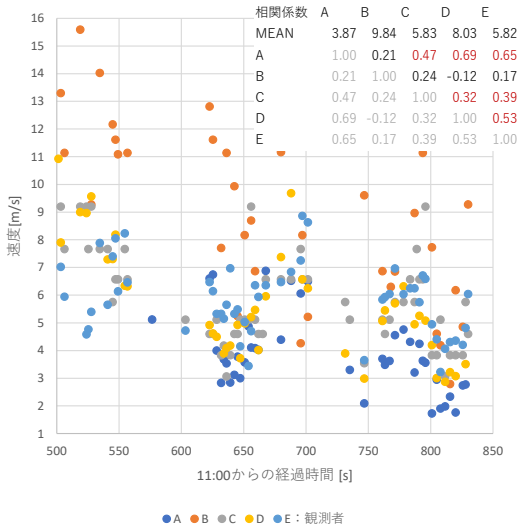


図-1.8 観測者間バイアスの確認

試料採取の直前に観測した交差点交通量の結果は【項目3】に試料採取の結果と合わせて示す。交通量に加えて、交差点30～60m上流における3地点で速度の観測も行っており、速度観測結果を図-1.9に示す。主に青信号の時に車両が通過するため、速度が観測される時間帯と観測されない時間帯が繰り返されており、特に青終了間際の速度が低い値を示していることがわかる。速度の差分から算出した加速度と減速度の平均値からは、交差点上流40m前後で観測される加減速（特に減速度）が比較的小さいと

いう多摩市乞田での観測結果と同等の結果が得られ、双方の結果の妥当性が高いことが示された。

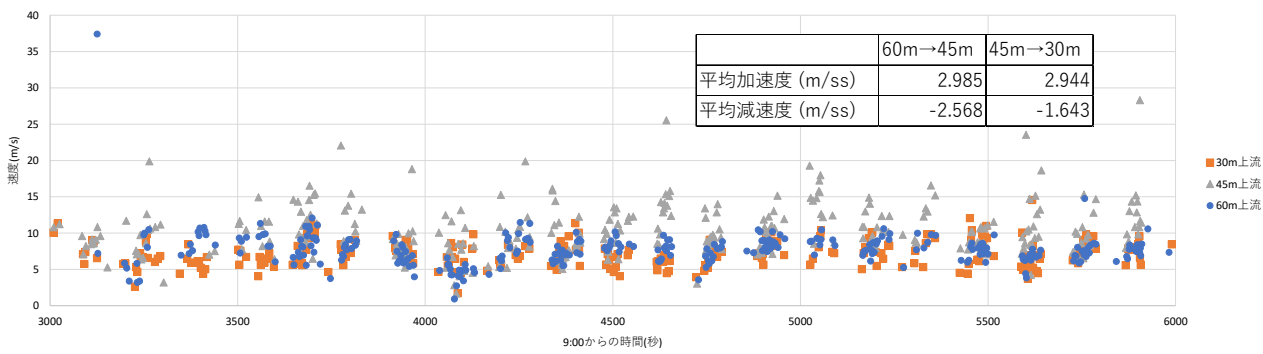


図-1.9 速度観測結果

【項目3：マイクロプラスチックの分布と交通流の関連性の分析】

(1) 直線走行区間における検討

① 調査地点の概要

計4回にわたり、3地点、延べ19か所でサンプリングを実施した。サンプリング概要を以下に示す。また、各地点の写真について図-1.10に示す。直線走行区間におけるサンプリングは、2021年3月9日、4月27日、7月20日、10月8日の計4回行った。道路交通センサスによる交通量は約10000台～26000台の所を選択した。その他の条件として、法定速度、先行晴天日数、停止線からの距離などの条件を併せて記した。

② 調査結果

MPs数の結果を図-1.11に示す。調査番号1の八王子市南大沢では計13個、調査番号2の多摩市乞田では計17個となった。続いて複数箇所サンプリングを行った調査番号3の多摩市乞田では30mで計35個、50mで計26個、70mで計40個、調査番号4の多摩市乞田では左車線30mで計34個、左車線50mで計30個、左車線70mで計40個、左車線150mで計31個、右車線30mで計22個、右車線50mで計38個、右車線70mで計55個となった。最後に調査番号5の多摩市馬引沢では左車線30mで計23個、左車線50mで計35個、左車線70mで計26個、左車線150mで計25個、右車線30mで計16個、右車線50mで計38個、右車線70mで計24個となった。

粒径別にみると、 $105\mu\text{m}$ 以上の粒子径が一番多く占めており、全体のMPs数の傾向と沿うような結果が得られた。一方で、 $105\mu\text{m}$ 以下の粒子径に関しては調査番号4の右車線30mや50m、調査番号5の右車線30mの3地点を除けばすべて9個から16個の範囲内に収まっている。加えて調査番号4の右車線70mと調査番号5の左車線50mの2地

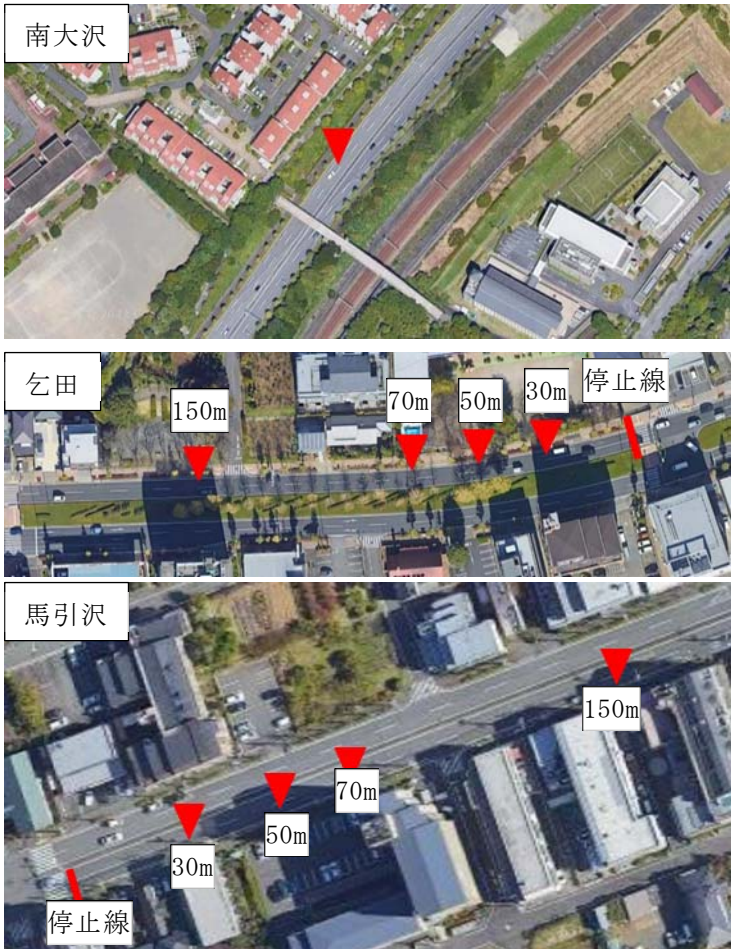


図-1.10 各地点の道路状況

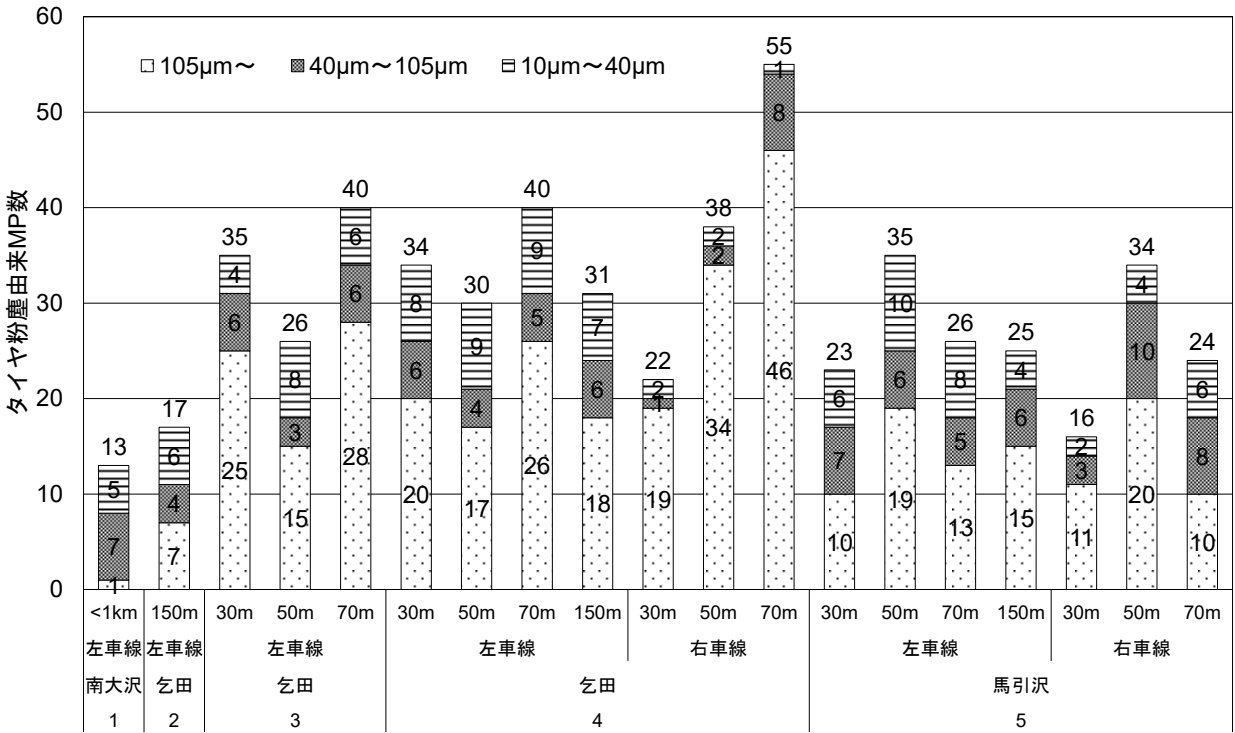


図-1.11 直線走行区間におけるタイヤ粉塵由来MP数

点を除けば10~14個の範囲内に分布していることが明らかになった。

③ 考察

a) 交通量との関係

交通量とMPs数の関係をまとめたものを図-1.12に示す。調査番号1の南大沢の結果と調査番号2の乞田の結果を比較すると、同日にサンプリングを実施し、交通量は八王子市南大沢5丁目で17376 [台/日]、多摩市乞田で26033 [台/日] となっている。このことから、交通量が1.5倍になるとMPsは13個から17個に増加し、約1.3倍にMPs数が増えるという結果になり、交通量とMPsの関連性は少なからずあると推察された。

同様に、調査番号4の乞田の結果と調査番号5の馬引沢の結果を比較すると、乞田では先行晴天日数が4日で交通量は26033 [台/日]、馬引沢では先行晴天日数が5日で交通量は11673 [台/日] となっており、馬引沢のほうが乞田よりも先行晴天日数が1日多く交通量は半分以下というサンプリング条件であった。この2地点のサンプリング結果を見ると、サンプリングを行った7か所すべてのMPs数の合計が乞田は250個、馬引沢は183個になっており、馬引沢より乞田のほうがMPs数は多い結果となり先行晴天日数は短いものの交通量の影響でMPsが多くなったと考えられる。以上から、交通量がMPs数に影響することが示唆された。

b) 先行晴天日数

先行晴天に数とMPs数の関係をまとめたものを図-1.13に示す。調査番号2の乞田と調査番号4の左車線150mはほぼ同一の場所で先行

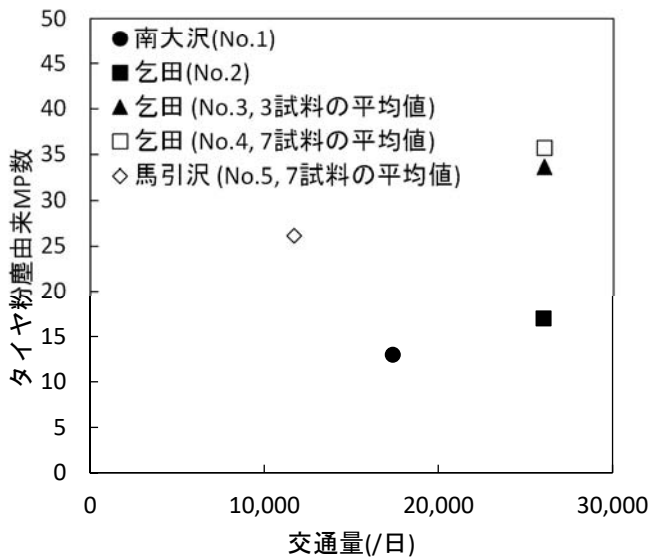


図-1.12 交通量と粒子数の関係

晴天日数によるMPs数を比較した。調査番号2は先行晴天日数が0日(20h)でMPs数は17個、調査番号4は先行晴天日数が4日でMPs数は31個となり、約1.8倍MPs数が多くなった。このことから、先行晴天日数による違いがMPs数に影響していることが示された。同様に、調査番号3と調査番号4の左車線の30m・50m・70mの3か所で先行晴天日数によるMPsを比較した。調査番号3では先行晴天日数が8日、調査番号4では先行晴天日数が4日となっており、先行晴天日数の差があるにもかかわらずタイヤ粉塵由来のMPsの数は同程度となった。この結果から、直近で観測した降雨からある程度の時間が経過すればMPsが一定数で滞留することが示唆された。実際に既往の研究(21)では、雨が止んでから3日間には指数関数的にMPs数が増加し、それ以降は変わらないことが示されている。よって、タイヤ粉塵においても直近の降雨から一定時間経過するとMPsの量に変化が見られずその数は一定数に留まることが示された。

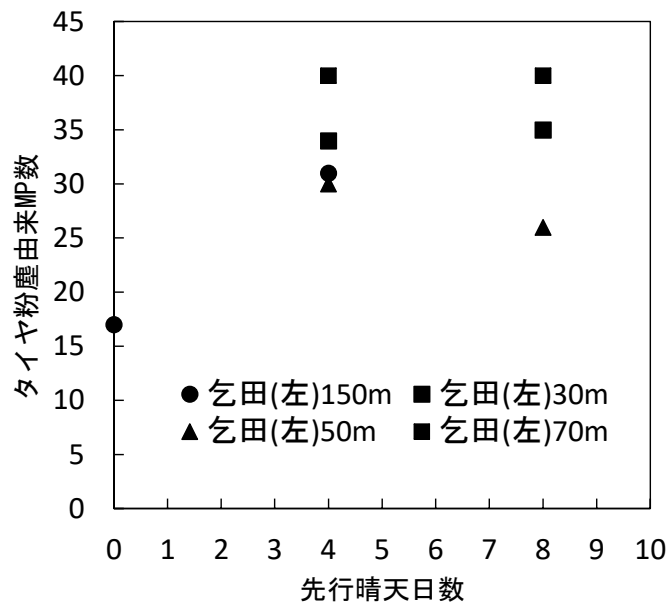


図-1.13 先行晴天日数と粒子数の関係

c) 車両挙動

車両挙動との関連分析については、交通工学で用いられているジレンマゾーンの知見を主に参考にして分析を行った。ジレンマゾーンとは、信号が黄色に変わったとき、そのときの走行速度と停止線までの距離の関係で、そのまま進むべきか停止するべきかという迷いが生まれる一帯のことを指す(18)。

まず、調査番号3と4の結果について考察する。サンプリングした都道158号線は法定速度が60km/hと定められていることから、60km/hで走行していると仮定した。この場合、黄信号開始時の停止線までの距離が0～50m以内の場合は通過、60mより離れている場合は停止の挙動を起こしやすく、迷いなく走行できると考えられている。よって今回の場合は、70mでは停止が主な挙動と考えられ、50mや30mでは通過する車が大半を占めると想定される。結果として、左車線では70m地点でMPs数が多くなっており、70m>30m>50mの順となった。

続いて右車線の結果を見ると、左車線と同様70mで最も多いことは変わらないが、70m>50m>30mの順に多い結果となり、50mと30mの傾向で違いが生じた。この原因としては、左車線の左車線と右車線で交通量に差があることが考えられる。左車線にバス停があることや右折車が多くいることから、右車線に車両が集中し、全体の走行速度が落ちていることが予想され50m付近でも停止挙動を起こす車両が多かったことが推察される。MPs数も左に比べて多く、ここでも交通量の差が影響しているものと考えられる。

実際に調査番号3と4でサンプリングを行った多摩市乞田では現地によるビデオ調査も行い、リアルタイムでの車両挙動の分析も実施した。1mごと、車線ごとに速度と加速度のデータの平均値を算出したものを図-1.14に示す。その結果、全体の大きな傾向として30m以上の部分で速度が大きくなる傾向にあることが明らかとなった。また、加速度・減速度の大きさを見ると停止線に近づくにつれて大きくなる傾向が読み取れた。

さらに詳細にみていくと、加速度に関しては70mから60mにかけて大きくなる結果が得られており、減速度は80m付近で大きくなる傾向が得られた。よって60mから80m付近にかけて加速と減速を繰り返し挙動が複雑化している可能性が示唆された。これによって70m付近でMPs数が増大したことも推察できる。

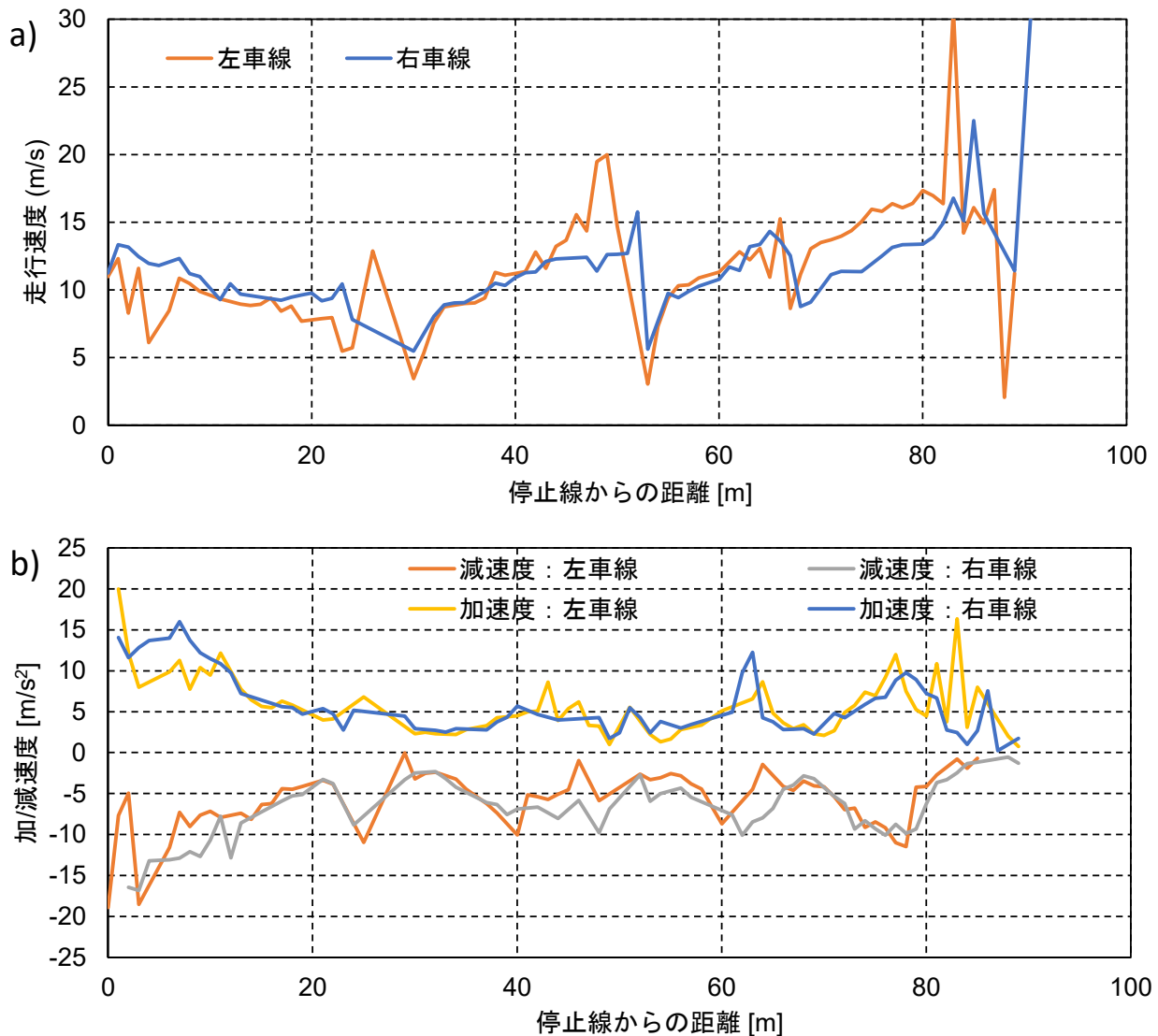


図-1.14 先行晴天日数と粒子数の関係

次に、調査番号5の結果を見ていく。サンプリングした都道18号線は法定速度が50km/hと定められていることから、50km/hで走行していると仮定した。この場合は、50mや70mで停止が主な挙動と考えられ、30mでは通過する車が大半を占めると想定される。結果として、左車線においては50m地点でMPs数が最も多くなっており、50m>70m>30mの順となった。このことから、馬引沢においては50mで最も停止挙動に伴うブレーキが大きくはたらき、MPs数を増大させていることが考えられる。同様に右車線の結果を見ると、左車線と同様50mで最も多く50m>70m>30mの順に多い結果となり、左車線と同じ傾向を示した。現地調査で目視した限り車線間での交通量の差が小さかったことから、同じの傾向になったと考えられる。

以上から、乞田と馬引沢の結果から停止挙動を起こす範囲内の中でも停止線までの距離が近い地点でブレーキが強くはたらき、MPs数を増大させている要因の一つであることが示唆された。

④ まとめ

本研究では、一般道路の道路粉塵を採取しタイヤ粉塵由来のMPsの存在実態を把握するために、道路でのサンプリングを実施し、MPsの存在実態把握を試みた。その結果、交通量が多いほどMPs数は増加する傾向にあること、降雨直後はタイヤ粉塵が増加傾向にあるが、一定時間経過すると路面上に滞留するMPs数は変わらないこと、車両挙動との分析では、停止によるブレーキングがMPs数に影響することが示唆された。



図-1.15 試料採取地点(左：交差点全景、右下：Uターン区間内試料採取地点、
右上左：入口区間(a地点より本線側)の写真、右上右：b地点付近内側からの写真)

(2) 曲線走行区間における検討

① 調査地点の概要

サンプリングは東京都八王子市別所の小山乞田線(都道158号線)と町田平山八王子線(都道155号線)の交差点内のUターン路の曲線部で行った。Uターン路はU字の形をした道路であり、目的としている曲線道路でのサンプリングが行うことができる。交差点付近で測定された都道158号線の該当交差点付近の交通量は、23800台/日である。なお、このうち現地で一定時間の車の進入量を観測したところUターン路の交通量は1000~2000台/日と推定した。

なお、Uターン路における道路形状であるが、道路構造令5)より曲線道路には緩和区間が設けられている。そのことを考慮し図-1.15のように緩やかに減速する緩和区間内(a)、最も半径が小さくなる部分(b)、曲線から直線へと移り変わる(c)の3地点で、内輪と外輪に分けて計6地点のサンプリングを行った。これは曲線部では内輪のほうがより曲線半径が小さい分、遠心力が強く働くため摩擦も大きくなりより多くのタイヤ摩耗が発生すると予想したためである。

1地点の範囲は内輪側と外輪側をそれぞれ3m²、30秒ずつ掃除機を使ってサンプリングを行い、内輪側と外輪側を足して6m²、60秒でこれまでの試料採取条件が同一になるように範囲を設定した。先行晴天日数は3日である。

② 調査結果及び考察

観測結果の個数を図-1.16に示した。緩やかに減速する緩和区間内(a)では合計279個、最も半径が小さくなる部分(b)では合計850個、緩やかに加速する緩和区間内(c)では合計482個となった。よって、 $b > c > a$ の順にタイヤ粉塵由来と推定されるMPsの数が多い結果となった。また各地点で外輪より内輪の方がタイヤ粉塵由来と推定されるMPsが多い結果となった。b地点の内輪、外輪、a地点の内輪では粒径の大きいものから多く検出されていたが、a地点の外輪、c地点は内輪、外輪ともに $4.75\text{mm} \sim 105\mu\text{m} > 40\mu\text{m} \sim 10\mu\text{m} > 105\mu\text{m} \sim 40\mu\text{m}$ となっており粒径の大きさは比例していなかった。a地点では内輪と外輪とではMPsの数量の差が小さかった。

③ 考察

内輪と外輪を比較した時、内輪の方が曲線半径は小さくなるため、3地点すべてで内輪の方がより多くのMPsの検出量が多かったと考えられる。3地点を比べても最も曲率が高く曲線半径は小さくなるb地点は他の2地点に比べて圧倒的に検出量が多かったのも妥当であると考えられる。

一方で過去の先行研究では先行晴天日数6日の際の結果で、タイヤ摩耗であると考えられるゴムの個数は数個であったが、その結果と比べて先行晴天日数3日で行われた本実験で得られたMPsの検出量が異常に大きいと考えられる。この要因として考えられることとして、第一に曲線道路であること、そして第二に観測地点の形状にあると考えられる。すなわち、該当のUターン路は一車線で道幅も狭く両サイドの路側帯が高くなっており道路粉塵が風の影響で路側帯の方に飛ばされる可能性が低い結果、このような数を検出した可能性があると思われる。また、a地点に関してb、cに比べてMPsの量が少ないのはサンプリング地点がb、cのように閉鎖的になっておらず本線側へ散逸しやすい可能性があること、曲率も小さく、また緩和区間で減速し終わった車が進入するのでタイヤと路面との間に摩擦が小さいためであると考えられる。

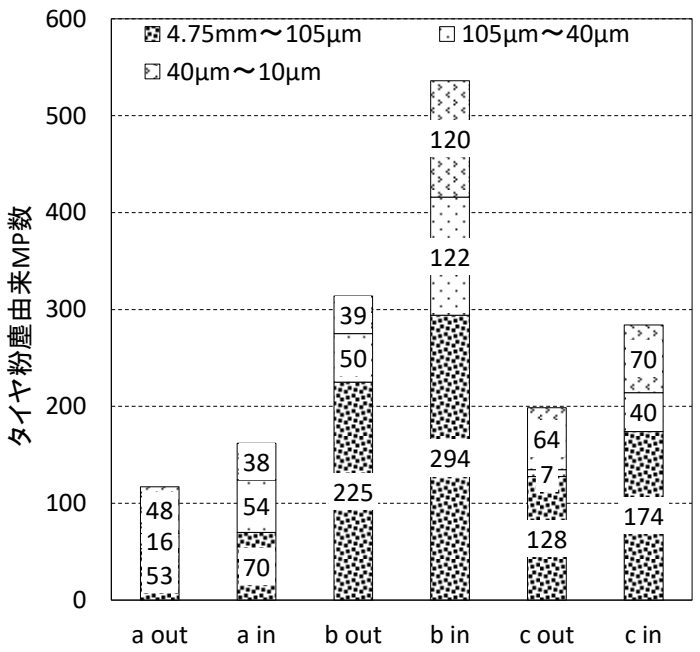


図-1.16 曲線走行区間におけるタイヤ粉塵由来MP数

④ まとめ

本研究では、曲線走行区間にて道路粉塵を採取しタイヤ粉塵由来のMPsの存在実態の把握をするため、実際に道路でサンプリングを実施しMPsの存在実態把握を試みた。過去の文献1) 2) では直線道路でのサンプリングが主流だったため、曲線道路でサンプリングを行い、既存の研究で取り扱われてきた粒径より小さいものを観測の対象とした。

MPsの数量から曲線走行区間では直線道路に比べて多くのタイヤ粉塵由来のMPsが検出されることがわ

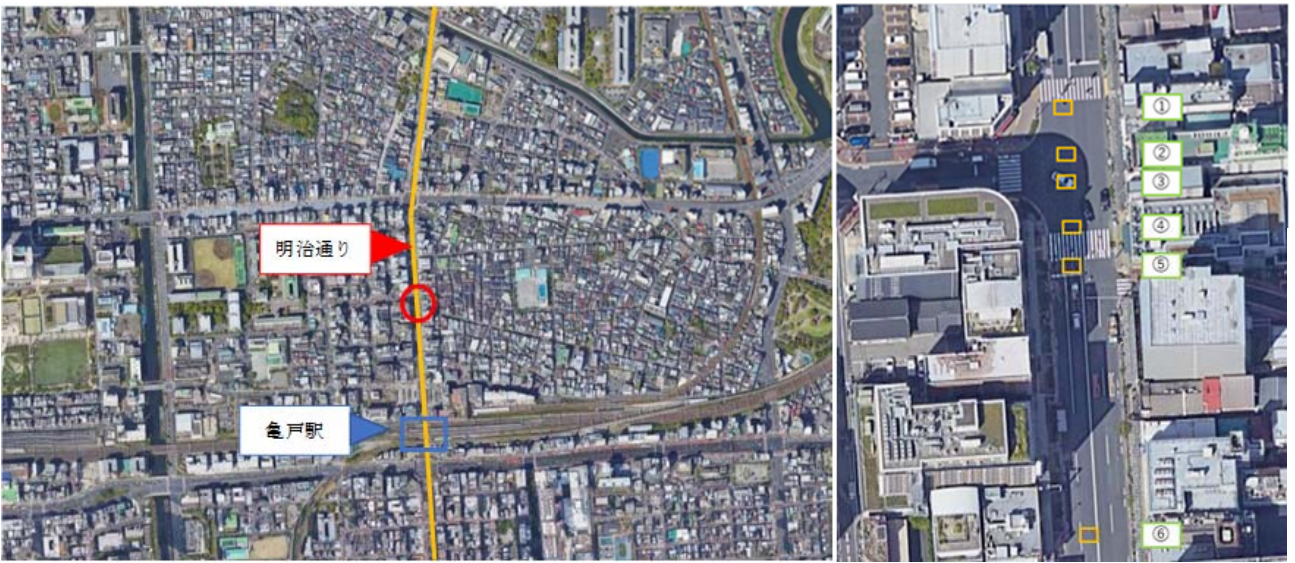


図-1.17 試料採取地点(左：対象地、右：採取地点)

かり、曲線半径が小さくなるほどタイヤと路面との間に発生する摩擦力が大きくなるためMPsの増大に寄与することが示唆された。また粒径の小さいMPsが多く検出されたのは長期間道路上に存在し、雨や風等の様々な要因でMPsの粒径が小さくなったからであると考えることができた。

今後は別の曲線道路や勾配が大きい坂道などタイヤに摩擦力が働きやすい環境でサンプリングを行い、様々な交通挙動でMPsの発生率がどのように変化するかを調べていく必要がある。粒径に関しては粒径と道路形状や交通量との関係性を研究していく必要があると考える。

(3) 複合走行区間(交差点)における検討

① 調査地点の概要

交差点内の車両挙動に着目し、サンプリング地点を選定した。場所はJR総武線亀戸駅北口の明治通りで行った。この地点は、道路交通センサスによる交通量で約11000台の交通量がありながら、日曜日・祝日の12時から17時まで歩行者天国になるため、安全に交差点内で試料採取を行うことができる。具体的には、明治通り内回り方向第2車線において、交差点内の4箇所に加え、停止線直後とその手前の直線部分の計6か所でサンプリングを実施した（図-1.17）。なお、先行晴天日数は3日であった。

② 調査結果及び考察

サンプリング結果を図-1.18に示す。亀戸①では合計186個、亀戸②では合計214個、亀戸③では合計177個、亀戸④では合計83個、亀戸⑤では合計47個、亀戸⑥では合計77個であった。

交差点内におけるMPs数については、サンプリング地点のMPs数と交通量あたりのMPs数の2点に着目して考察を行った。

サンプリングを行った交差点における第2車線（青線）とそれに関わる動線の様子を矢印で図示した（図-1.19）。考察をするにあたり、複数車線が交わる亀戸①②③と交わらない亀戸④⑤⑥の2グループに分けてその2つを比較する。

まず、MPs数で比較する。亀戸①②③が亀戸④⑤⑥に比べ2倍以上MPs数が多くなっていることから交差点内で複数車線が交わる地点のMPs数が増えることが示された。さらに、各サンプリング地点のMPs数[個]を実際の交通量[台/日]で除して交通量あたりのMPs数[個/台/日]を算出し、これら実際の交通量と交通量あたりのMPs数をまとめて比較するグラフを図-1.20に図示した。その結果、交通量あたりのMPs数でも亀戸①②③が亀戸④⑤⑥に比べ2倍程度多く、交差点内で複数車線が交わる地点のMPs数が増える要因として交通量の増加だけではなく、車両のカーブや減速、加速でタイヤの摩擦が増えたことが影響していると示唆された。なお、この点に関連して、採取地点で採取し

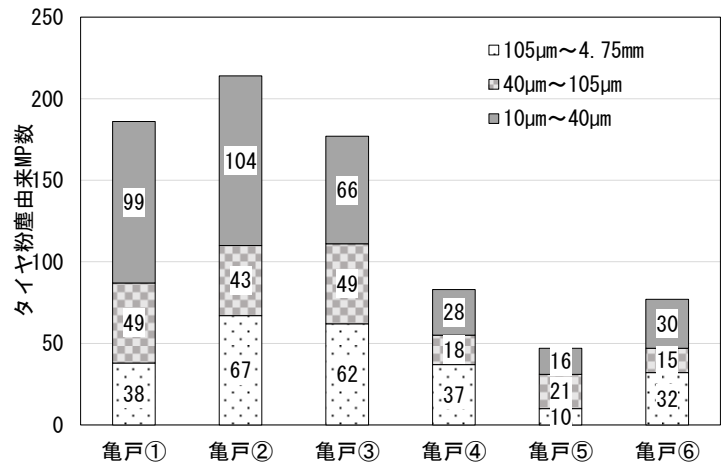


図-1.18 曲線走行区間におけるタイヤ粉塵由来MP数

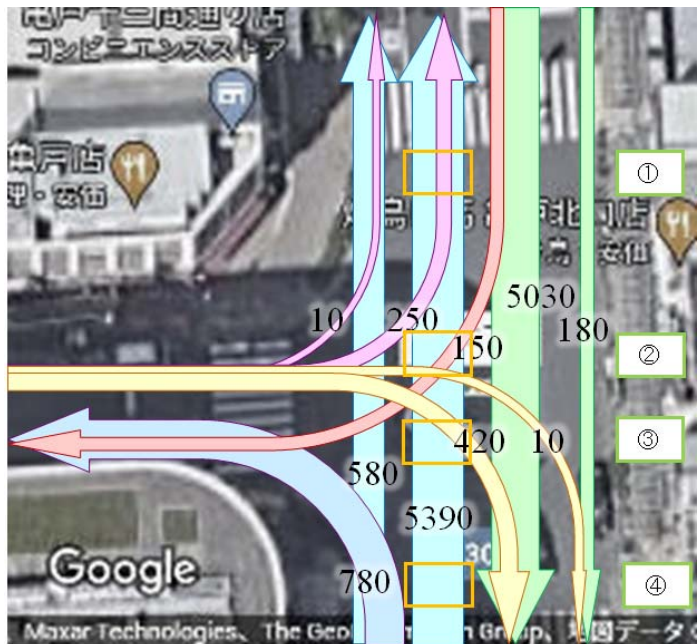


図-1.19 交差点付近における交通量

た試料の粒径分布の割合を算出し、それを亀戸①②③と亀戸④⑤⑥の2グループに分けて統計的に解析した。しかしながら、粒径分布の割合について、両グループ間には有意な差は見られなかった。

③ まとめ

本研究では、交差点内のMPs数に着目したところ、特に交差点内の他車線からの車両と交わる地点のMPs数が直線に比べ2倍以上多かった。この要因が交通量によるものか判断するために各サンプリング地点の交通量当たりのMPs数を算出したが、同様に交差点内のサンプリング地点が多かったため交通量に関わらず交差点内のMPs数が多くなることが示された。

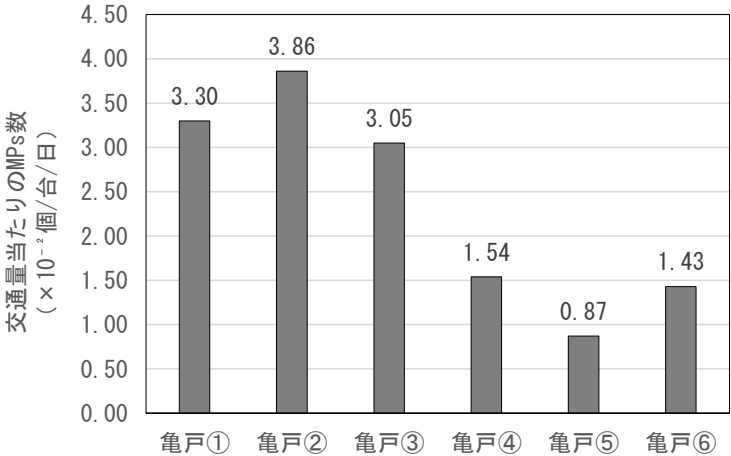


図-1.20 交通量当たりのタイヤ粉塵由来MP数

(5) まとめ

以上、見てきた通り、直線走行区間では主に交通量に比例すること、加減速によって追加的に排出されること、曲線走行では台数当たり排出量が増加すること、複合走行区間(交差点)では、曲線走行に伴う台数当たり排出量の増加によって排出量が増加することなどが分かった。従って、交差点付近を重点的に清掃することで、排出量の低減につながると期待される。

5. 研究目標の達成状況

サブテーマ 1 目標	目標の達成状況
タイヤ粉塵から発生するマイクロプラスチックを対象とし、実際の路上での発生及び存在状況を100個以上の粒子について明らかにすると同時に、タイヤ粉塵の発生に影響を及ぼすと考えられる交通流との関連を解析する。	<u>目標を上回る成果をあげた。</u> タイヤ粉塵由来マイクロプラスチックを測定する手法を開発し、実際の路上におけるサンプリングへ適用した。 実際の路上での発生及び存在状況について、100個を大幅に上回る数の粒子を観察・同定した。これは、目標とする地点数を適切に確保したのみならず、既存研究と比較して面積あたり粒子数が多い結果を得たためである。この要因としては、観察・同定手法に改良を加えたこと、既存研究では実施していない曲線走行区間で試料採取を行ったためである。特に手法の改良を行ったことで目標を上回る結果につながったといえる。 交通流の影響として、道路の制限速度、停止線からの距離、曲線走行について検討した。さらに、それらの影響が複合する交差点において試料採取を行い、曲線走行による影響が卓越することを示した。こちらは、計画通りに遂行することで目標を達成したと言える。 以上の通り、目標を上回る成果をあげた。

6. 引用文献

- 1) 岡本萌巴美、田中周平、雪岡聖、藤井滋穂、Sangeeta Singh、高田 秀重：ネパール国カトマンズ市におけるマイクロプラスチックの存在実態の把握および河川への負荷源の推定、土木学会論文集 G、75、III_127-134、2019.
- 2) Kreider, M.L., Panko, J.M., McAtee, B.L., Sweet, L.I., Finley, B.L., : Physical and chemical characterization of tire-related particles: Comparison of particles generated using different methodologies, Science of The Total Environment, 408, pp.652-659, 2010.

Ⅲ. 研究成果の発表状況の詳細

(1) 誌上発表

<査読付き論文>

【サブテーマ1】

- 1) G. Oyama, M. YANAGIHARA, H. SAKAI: J. Environ. Saf. (2023) Occurrence of Tire-derived Microplastics at a Curvilinear Road Section, (accepted)
- 2) C. NISHIMAGI, M. YANAGIHARA, Y. FANG, H. SAKAI: H2Open Journal (2023) Occurrence of Tire-Derived Microplastics (TMPs) Focusing on Driving Behavior, H2Open Journal, (accepted)

<査読付き論文に準ずる成果発表>

【サブテーマ1】

特に記載すべき事項はない。

<その他誌上発表（査読なし）>

【サブテーマ1】

特に記載すべき事項はない。

(2) 口頭発表（学会等）

【サブテーマ1】

- 1) Hiroshi Sakai: The 4th International Forum on Asian Water Environment Technology (2021) 「Occurrence of microplastic from tyre wear particle」
- 2) 西間木千智、酒井宏治、柳原正実: 土木学会環境工学委員会、第58回環境工学研究フォーラム (2021) 「タイヤ粉塵由来のマイクロプラスチックの自動車走行に伴う存在実態の解明」
- 3) 酒井宏治、西間木千智、石井里実、方一鳴: 土木学会関東支部、第48回関東支部技術研究発表会 (2021) 「タイヤ粉塵由来マイクロプラスチック測定のための手法の検討」

(3) 「国民との科学・技術対話」の実施

【サブテーマ1】

- 1) 神奈川県立相模原高等学校在学学生を対象とした模擬授業「タイヤ粉塵由来のマイクロプラスチック発生」（2021年11月15日、聴講者約30名）

(4) マスコミ等への公表・報道等

【サブテーマ1】

特に記載すべき事項はない。

(5) 本研究費の研究成果による受賞

【サブテーマ1】

特に記載すべき事項はない。

(6) その他の成果発表

【サブテーマ1】

特に記載すべき事項はない。

IV. 英文Abstract

Occurrence of Microplastics from Tire Wear Particles and Effects of Road Traffic Flow on Spatiotemporal Distribution

Principal Investigator: Hiroshi SAKAI, Masami YANAGIHARA

Institution: Tokyo Metropolitan University, 1-1, Minami Osawa, Hachioji City,
192-0397, JAPAN

Tel: 042-677-2789/Fax: 042-677-2789

E-mail: h_sakai@tmu.ac.jp

[Abstract]

Key Words: Tire wear particles, Microplastics, Traffic Flow, ATR-FTIR, Database

Microplastic analysis and traffic flow analysis were conducted. In the analysis, the temporal and spatial distribution of tire dust was clarified by collecting samples under various road conditions. Specifically, by taking samples at different points before and after intersections and in different lanes on the same road, we were able to clarify traffic flow focusing on driving behaviors such as acceleration and deceleration, and by taking samples at curved sections and intersections, we were able to clarify the relationship with the road structure and design. As a result, it was found that in straight sections, number of microplastics is generally proportional to traffic volume and is affected by braking, that in curved sections, emissions per vehicle increase due to the radius of curvature, and that in intersections emissions are affected by both of these factors.